

中专工业与民用建筑专业教学丛书

地基与基础

(第二版)

沈克仁 主编

中国建筑工程出版社



中专工业与民用建筑专业教学丛书

地基与基础

(第二版)

沈克仁 主编

中国建筑工业出版社

出版说明

1991年由建设部中等专业学校工业与民用建筑及村镇建设专业指导委员会组织编写、评选、推荐出版了“中专工业与民用建筑专业教学丛书”一套8门课程共11册。在各有关学校及社会读者的使用中受到了欢迎和好评。为了适应教育教学改革的深入开展和满足建筑技术进步的要求，经我司与中国建筑工业出版社商议，本着精益求精的原则，在广泛征求各有关中专学校意见的基础上，对这套教学丛书进行了修订，现作为全国建设类中等专业学校工业与民用建筑专业试用教材出版。

这套教材采用了国家颁发的现行规范、标准和规定，内容符合建设部颁发的普通中等专业学校工业与民用建筑专业毕业生业务规格、专业教学计划和课程教学大纲的要求，并且理论联系实际，取材适当，反映了目前建筑科学技术的先进水平。

这套教材适用于普通中等专业学校工业与民用建筑专业和村镇建设专业相应课程的教学，也能满足职工中专、电视函授中专、中专自学考试、专业证书和技术培训等各类中专层次相应专业的使用要求。为使这套教材日臻完善，望各校师生和广大读者在教学过程中提出宝贵意见，并告我司职业技术教育处或专业教学指导委员会，以便进一步修订。

建设部人事教育劳动司

1995年2月

前 言

本书在原中专工民建专业教学丛书的基础上进行修订,作为全日制中专工民建专业教学用书。修订时仍以建设部颁发的普通中等专业学校工民建专业毕业生业务规格、专业教学计划和《地基与基础》课程教学大纲为依据。编写依据的规范有:《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)、《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)、《砌体结构设计规范》(GBJ3—88)、《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ112—87)、《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)、《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)、《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)、《土工试验方法标准》(GBJ123—88)等。根据教学要求,本书叙述必要的基本理论,避免公式繁琐推导,注重实用,并考虑一定的知识面。由于地区性地基的差别,对第八~十章内容,在组织教学时可有所选择与侧重。

本书由浙江省建筑工业学校沈克仁担任主编并统稿。其中绪论、第一~七章由沈克仁编写。第八~十章由方丽芬编写。土工试验指导书由江巧云编写。沈毅参加插图绘制。全书修订后由上海市建筑工程学校杜秉宏主审。

由于编者水平有限,书中有不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

绪论.....	1
第一章 土的物理性质与工程分类.....	3
第一节 土的成因	3
第二节 土的组成与结构	4
第三节 土的物理性质指标	7
第四节 无粘性土的特征	10
第五节 粘性土的特征	11
第六节 粉土的特征	12
第七节 土的工程分类	13
第二章 土中应力	17
第一节 土中自重应力	17
第二节 基底压力	18
第三节 土中附加应力	21
第三章 地基的变形	30
第一节 土的压缩性	30
第二节 地基变形特征及地基变形允许值	33
第三节 地基变形的计算	34
第四节 基础沉降随时间变化的概念	40
第四章 土的抗剪强度和地基承载力	46
第一节 土的抗剪强度及其测定方法	46
第二节 土的极限平衡条件	49
第三节 地基的塑性荷载与极限荷载	50
第四节 地基承载力的确定方法	53
第五节 工程地质勘察报告的阅读	62
第五章 浅基础设计	71
第一节 基础设计的原则与步骤	71
第二节 浅基础类型	73
第三节 基础埋置深度	76
第四节 基础底面积的确定	79
第五节 刚性基础设计	86
第六节 墙下钢筋混凝土条形基础	87
第七节 柱下钢筋混凝土独立基础	89
第八节 柱下钢筋混凝土条形基础	95
第九节 柱下交叉条形基础	106
第十节 筏板基础	108

第十一节 减少不均匀沉降的一般措施	111
第六章 边坡稳定及挡土墙	117
第一节 边坡稳定	117
第二节 挡土墙	120
第七章 桩与深基础	137
第一节 桩基础的类型	137
第二节 设计原则	143
第三节 单桩竖向承载力	143
第四节 群桩基础	151
第五节 桩承台	158
第六节 桩基计算例题	166
第七节 桩侧负摩阻力和桩的抗拔力	174
第八节 水平荷载作用下桩基的设计	176
第九节 沉井、地下连续墙	182
第八章 地基处理	186
第一节 机械压实法	186
第二节 换土垫层法	189
第三节 挤密法	190
第四节 排水固结法	192
第五节 化学加固法	194
第九章 特殊土地基	197
第一节 软土地基	197
第二节 湿陷性黄土地基	198
第三节 膨胀土地基	202
第四节 红粘土地基	206
第十章 地基基础的抗震	208
第一节 概述	208
第二节 地基的震害	209
第三节 地基基础的抗震	209
土工试验指导书	213
〔试验一〕 土的基本物理指标的测定	213
〔试验二〕 粘性土的液限、塑限试验	218
〔试验三〕 土的压缩(固结)试验	222
〔试验四〕 直接剪切试验	225

绪 论

一、地基与基础的概念

通常将埋入土层一定深度的建筑物下部承重结构称为基础。建筑物荷载通过基础传至土层，使土层产生附加应力和变形，由于土粒间的接触与传递，向四周土中扩散并逐渐减弱。我们把土层中附加应力与变形所不能忽略的那部分土层（或岩层）称为地基。地基是有一定深度与范围，基础下的土层称为持力层；在地基范围内持力层以下的土层称为下卧层，强度低于持力层的下卧层称为软弱下卧层。基底下的附加应力较大，基础应埋置在良好的持力层上（图 0-1）。

二、地基基础设计的基本要求

地基基础设计应满足下列基本要求：

（1）应使地基有足够的强度，在荷载作用后，地基土不发生剪切破坏或失稳。

（2）不使地基产生过大的沉降和不均匀沉降，保证建筑物的正常使用。

（3）基础结构本身应有足够的强度和刚度，在地基反力作用下不会产生强度破坏，并具有改善沉降与不均匀沉降的能力。

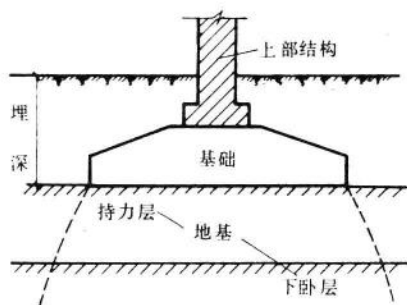


图 0-1 地基与基础示意

良好的地基一般具有较高的承载力与较低的压缩性，易满足工程上要求。软弱的地基，其工程性质较差，应进行地基处理。经过处理而达到设计要求的地基称为人工地基，不需处理而直接利用的地基称为天然地基。建筑物一般宜建造在良好的天然地基上，但为节约用地，也要充分利用工程性质较差而经过处理后的地基。

三、地基与基础在工程中的重要性

基础是建筑物的重要组成部分，地基基础设计不当，将影响到建筑物的正常使用与安全，轻则上部结构开裂、倾斜，重则建筑物倒塌，危及生命与财产安全。例如：1941 年加拿大特朗斯康谷仓（长 60m、宽 23m、高 31m、重 $2 \times 10^5 \text{kN}$ ），建造在 16m 厚的可塑至流塑粘土层上，由于设计时疏忽了地基持力层下部的软弱土层，在建成后第一次装料时，就因软弱下卧层失稳而发生整体倾倒；1958 年巴西 11 层大楼（长 29m，宽 12m），支承在 99 根 21m 长的钢筋混凝土桩上，桩长不够，未能打入较好土层，因承载力不足，建成后即倒塌；著名的意大利比萨斜塔由于建造在不均匀的高压缩性地基上而发生倾斜，至今仍以每年 1mm 的速率下沉。国内地基基础大小质量事故也曾不少，应引以为鉴。

地基基础设计要充分掌握地基土的工程性质，从实际出发作多种方案比较，更不能盲目套用，以免发生工程事故。一般地基基础费用约占总造价的 20%~25%，对高层建筑或需地基处理时，则所需费用更大，因此搞好地基基础设计对节约工程造价很有经济意义。地

基基础一旦发生质量事故，其修补工作要比上部结构困难得多。总之，对地基基础问题要引起足够的重视。

四、本课程的特点与任务

地基与基础是一门知识面广而综合性强的课程，它涉及到土力学、工程地质学、施工技术与建筑结构等方面的内容。学习本课程时应具有建筑结构与施工技术课的专业知识。

通过本课程的学习，应掌握地基土的物理性质与土力学的基本知识；能阅读与正确理解工程地质勘察报告；了解地基处理各种方法；能进行一般房屋的地基基础设计；学会基本土工试验的操作技能。

对于第九章的特殊土地基，教学时可根据地区特点有所选择；对于其他各章中某些内容也可根据各地实际情况有所侧重。

第一章 土的物理性质与工程分类

第一节 土的成因

地表岩石长期在不同温度、水、大气、生物活动及其他外力作用的影响下，不断破碎，并发生化学变化，这种变化称为岩石的风化。岩石的风化可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。由于温度变化，岩体胀缩开裂、裂隙中水的冻胀以及盐类物质的结晶而使岩石发生机械破碎作用的属于物理风化。由于水溶液、大气等因素影响下，引起岩石破碎和成分发生质的变化的属于化学风化。由于生物活动过程中产生对岩石的机械破碎以及生物新陈代谢分泌排泄物对岩石的化学侵蚀的属于生物风化。上述三种风化作用并不是孤立进行的，物理风化使岩石逐渐破碎、增大孔隙率和表面积，为化学风化创造条件，而化学风化使岩石松软，体积膨胀，从而促进物理风化的进行。

土就是岩石在长期风化作用下产生大小不同的松散颗粒，经过各种地质作用而形成的沉积物。根据地质成因的条件不同而有以下几种：

- (1) 残积土：岩石经风化作用而残留在原地的碎屑堆积物（图 1-1a）。
- (2) 坡积土：高处的风化物在雨水、雪水或本身的重力作用下搬运后，沉积在较平缓的山坡上的堆积物（图 1-1b）。
- (3) 洪积土：在山区或高地由暂时性山洪急流作用而形成的山前堆积物（图 1-1c）。
- (4) 冲积土：由河流流水的作用在平原河谷或山区河谷中形成的沉积物（图 1-1d）。
- (5) 淤积土：在静水或缓慢的水流作用下的沉积物。
- (6) 冰积土：由冰川或冰水作用形成的沉积物。
- (7) 风积土：由风力搬运形成的堆积物。

上述各种沉积土基本上是在地质年代①中新近的一个纪即第四纪(Q)内形成的(表 1-1)。由于沉积年份不同、地质作用不同以及岩石成分的不同，使各种沉积土的工程性质相差很大。

第 四 纪 地 质 年 代 表 1-1

纪	世		距今年数(百万年)
第四纪 Q	全新世	Q ₄	0. 025
	更新世	晚更新世 Q ₃	0. 150
		中更新世 Q ₂	0. 500
		早更新世 Q ₁	1. 000

① 地质年代是指地壳发展历史与地壳运动、沉积环境及生物演化相应的时代段落。

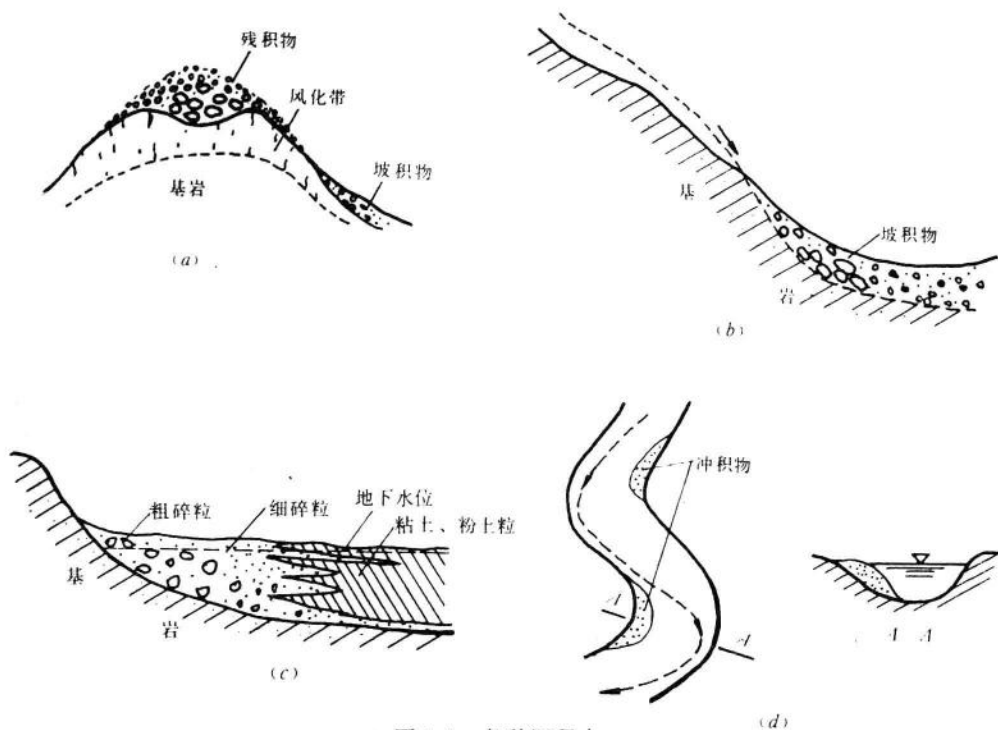


图 1-1 各种沉积土

(a) 残积土; (b) 坡积土; (c) 洪积土; (d) 冲积土

第二节 土的组成与结构

一、土的组成

土一般由矿物颗粒(固相)、水(液相)和空气(气相)组成。矿物颗粒是土的骨架,气体和水填充孔隙,故土为三相体系。孔隙完全被水充满时为饱和土,孔隙完全被气体充满时为干土。饱和土和干土均属二相体系。

1. 矿物颗粒

土粒大小与矿物成分的不同,对土的物理力学性质有较大的影响。例如土的颗粒变细,可使土从无粘性变化到有粘性。因此将土粒进行分组,将物理力学性质较为接近的土粒划为同一粒组。

(1) 粒组的划分 根据粒径大小可将土粒划分为块石(漂石)、碎石(卵石)、角砾(圆砾)、砂粒、粉粒及粘粒等六大粒组,各组的界限粒径分别是 200、20、2、0.075 和 0.005mm。某种土的颗粒大小及组成可通过土的颗粒分析确定。对于粒径小于等于 60mm、大于 0.075mm 的土可用筛析法,对于粒径小于 0.075mm 的土可用密度计法或移液管法。

筛析法就是用一套不同孔径的标准筛,称出留在各个筛子上的颗粒重,并算出相应的重量百分比,根据分析结果可判断颗粒的级配情况及确定土的名称。

标准筛孔径由粗筛孔径(60、40、20、10、5、2mm)及细筛孔径(2、1、0.5、0.25、0.1、0.075mm)组成。对于砂性土,可先将试样过 2mm 筛孔,当筛下的试样质量小于试样总质量的 10%时,可不作细筛分析;筛上的试样质量小于试样总质量的 10%时,可不作

粗筛分析；当不符合上述情况时，应将试样依次经粗筛及细筛进行筛析。

表 1-2 为某土样的颗粒分析结果，其分析结果还可用颗粒级配曲线表示（图 1-2），图中纵坐标表示小于某粒径的土重百分比，横坐标表示粒径，由于粒径相差较大，故采用对数横坐标表示。

颗粒分析表 表 1-2

筛孔直径 (mm)	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	0.075	底盘 <0.075	总计
留筛土重 (g)	176	198	153	185	226	366	708	652	86	84	2834
占全部土重的百分比 (%)	6	7	5	7	8	13	25	23	3	3	100
大于某筛孔径的土重百分比 (%)	6	13	18	25	33	46	71	94	97		
小于某筛孔径的土重百分比 (%)	94	87	82	75	67	54	29	6	3		

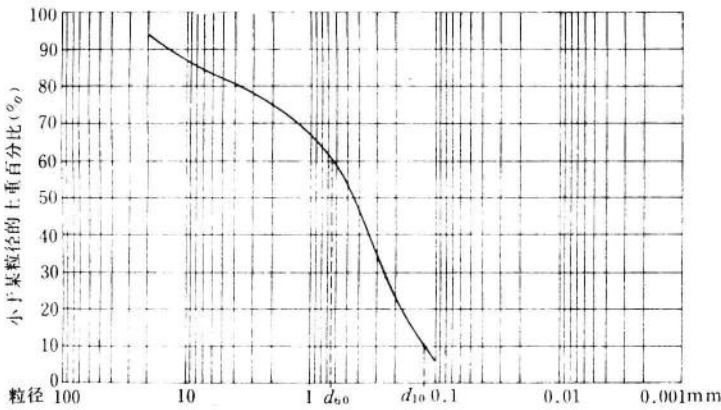


图 1-2 颗粒级配曲线示意图

工程上用不均匀系数 C_u 表示颗粒组成的不均匀程度：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1-1}$$

式中 d_{60} ——小于某粒径的土重百分比为 60% 时相应的粒径，又称限定粒径；

d_{10} ——小于某粒径的土重百分比为 10% 时相应的粒径，又称有效粒径。

当 $C_u < 5$ 时，表示粒径较均匀，级配不好。当 $C_u > 10$ 时，表示粒径不均匀，级配良好。
图 1-2 中的土样的不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 0.67/0.12 = 5.58$ ，级配尚好。

(2) 土的矿物成分 对于块石、碎石、角砾等粗大土粒的矿物成分与原生矿物相同。砂粒大部分是原生矿物的单矿物颗粒，如石英、长石、云母等。粉粒的矿物成分是多样的，主要有原生矿物的石英、次生矿物（岩石经化学风化作用形成的矿物）的难溶盐类（碳酸钙、碳酸镁）。粘土粒几乎都是次生矿物（粘土矿物、氧化物与难溶盐类等）及腐殖质。其中粘土矿物又分为高岭土、伊利土（水云母）和蒙脱土。高岭土是在酸性介质条件下形成的次生粘土矿物，遇水后膨胀性与可塑性较小。蒙脱土遇水后具有极大的膨胀性与可塑性。伊利土的性质介于高岭土与蒙脱土之间，比较接近蒙脱土。

2. 土中水
水在土中的存在状态有液态水、气态水和固态水。

固态水是指土中的水在温度低于 0℃ 时结成的冰，形成冻土。结冻时土的强度增强，解冻时土的强度迅速降低，往往低于原来的强度。

气态水是指土中出现的水蒸气，一般对土的性质影响不大。

液态水包括化学结合水、表面结合水及自由水。化学结合水是存在于土粒晶格结构内部的水，可作为矿物颗粒的一部分。故液体水主要是指表面结合水和自由水两大类。

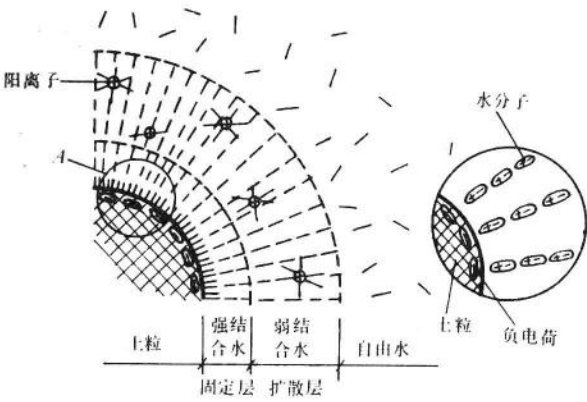


图 1-3 土中水的形态

界压力下可以挤压变形。弱结合水对粘性土的物理力学性质影响最大。砂土可认为不含弱结合水（图 1-3）。

自由水：在结合水膜之外的水，有重力水和毛细水两种。重力水存在于地下水位以下的土孔隙中，只受重力作用而移动，能传递水压力和产生浮力作用。毛细水存在于地下水位以上的土孔隙中，在土粒之间形成环状弯液面（图 1-4），弯液面与土粒接触处的表面张力反作用于土粒，形成毛细压力（或称毛细粘聚力），使土粒挤紧。土粒间的孔隙互相贯通，形成无数不规则的毛细管。在表面张力作用下，地下水沿着毛细管上升，故在工程中要注意地基土的润湿、冻胀及基础的防潮。

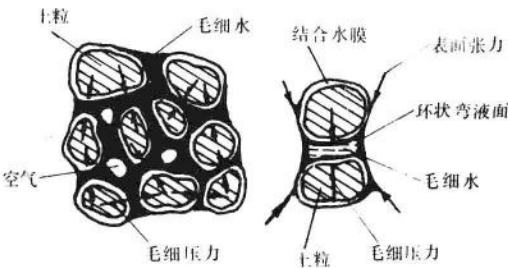


图 1-4 土粒间毛细水及毛细压力

3. 土中气体

粗粒土中的气体常与大气相通，在土受力变形时很快逸出。细粒土中的气体常与大气隔绝而成封闭气泡，在受压时气体体积缩小，卸荷后体积恢复，使土的弹性变形增加、透水性减少。含有机质的土，在土中分解出如甲烷、硫化气等可燃气体，使土层在自重作用下长期得不到压密。

二、土的结构

土的结构主要是指土体中土粒的排列与连接。土的结构有单粒结构、蜂窝结构和绒絮结构（图 1-5），蜂窝结构和绒絮结构又称海绵结构。

具有单粒结构的土是由砂粒等较粗土粒组成，土粒排列有疏松状态及密实状态，土粒排列密实时，土的强度较大。具有蜂窝结构的土是由粉粒串联而成。具有绒絮结构的土是

由粘粒集合体串联而成。后两种结构存在着大量的孔隙，结构不稳定，当其天然结构被破坏后，土的压缩性增大而强度降低，故对具有海绵结构的土也称为有结构性土。结构性的强弱可用灵敏度指标衡量，灵敏度 S_l 即是天然结构破坏前后的抗压强度的比值。 $1 < S_l \leq 2$ 为低灵敏度， $2 < S_l \leq 4$ 为中灵敏度， $S_l > 4$ 为高灵敏度。土的灵敏度愈高，则土的结构性愈强，扰动后土的强度降低愈多。故对高灵敏度的土在施工时需特别注意使其结构不受扰动。

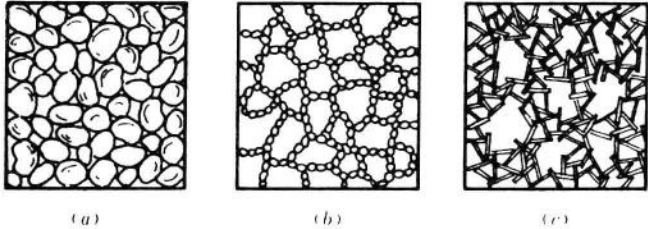


图 1-5 土的结构
(a) 单粒结构；(b) 蜂窝结构；(c) 絮絮结构

第三节 土的物理性质指标

一、土的三相图

土的三相图表示气体、水、颗粒间的数量关系，并可计算各项物理指标(图1-6)。设总体积 V 、颗粒体积 V_s 、水体积 V_w 、气体体积 V_a 、孔隙体积 V_v 、总重力 W 、颗粒重力 W_s 、水重力 W_w 、气体重力略去不计。则土的总体积与总重力分别为：

总体积 $V = V_s + V_w + V_a = V_s + V_v$ (m^3)
 总重力 $W = W_s + W_w$ (kN)

二、土的基本物理指标

1. 土的重力密度 γ 与质量密度 ρ
 土在天然状态时单位体积的重力称为重力密度，简称重度。

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s + V_w \cdot \gamma_w}{V}, \quad (kN/m^3) \quad (1-2)$$

水的重力 $W_w = V_w \cdot \gamma_w$ ，水的重度 $\gamma_w = 9.8 kN/m^3$ ，一般土的重度为 $16 \sim 20 kN/m^3$ 。
 土在天然状态时单位体积的质量称为土的天然质量密度，简称密度 ρ 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (kg/m^3 \text{ 或 } t/m^3)$$

重度 γ 与密度 ρ 关系为：

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

即土的重度 γ 为密度 ρ 与重力加速度 g 的乘积。

2. 土粒相对密度 d_s

土粒质量 m_s 与同体积的 $4^\circ C$ 时水的质量 m_w 之比，称为土粒相对密度，也称土粒比重。

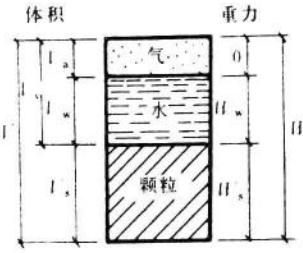


图 1-6 土的三相简图

$$d_s = \frac{m_s}{m_w} = \frac{W_s/g}{\frac{V_s \gamma_w}{g}} = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (1-3)$$

比重是没有单位的，而重力密度是有单位的。土粒比重一般为 2.6~2.8。

3. 土的天然含水量 w

土中水的质量和土粒的质量之比称为含水量，用百分数表示：

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{W_w/g}{W_s/g} \times 100\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (1-4)$$

上述基本指标 γ 、 d_s 、 w 由实验室测定，故又称室内土工实验指标。

三、土的其他物理指标

1. 饱和土的重力密度 γ_{sat}

土中孔隙 V_v 全被水充满时，单位体积的重力称为饱和土的重力密度，简称饱和土重度。

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + V_v \cdot \gamma_w}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-5)$$

2. 干土的重力密度 γ_d

土中无水时，单位体积的重力称为干土的重力密度，简称干土重度，用作评定土体紧密程度。

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-6)$$

3. 水下土的重力密度 γ'

在地下水位以下的土，由于受到水的浮力作用，使土的重力减轻，土受到的浮力即等于同体积的水重力 $V \cdot \gamma_w$ ，水下土单位体积的重力称为水下土的重力密度，简称有效重度。

$$\gamma' = \frac{W_s + V_v \cdot \gamma_w - V \cdot \gamma_w}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-7)$$

4. 土的孔隙率 n

土中孔隙体积与土的总体积之比称为孔隙率，用百分数表示：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

5. 土的孔隙比 e

土中孔隙体积与土粒体积之比称为孔隙比。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-9)$$

n 与 e 均反映土的密实程度，一般 $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土， $e > 1$ 的土是疏松的高压缩性土。

6. 土的饱和度 S_r

土中水的体积和孔隙体积之比称为饱和度，用百分数表示：

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-10)$$

S_r 反映土的潮湿程度，如 $S_r = 100\%$ ，土孔隙全部充水，土为完全饱和状态。如 $S_r = 0$ ，

土为完全干燥状态。

四、基本指标与其他指标的关系

上述指标 γ_{sat} 、 γ_d 、 γ' 、 n 、 e 、 S_r 均可由基本指标求得。为此可先将三相简图中的各符号变换, 如假设土粒体积 $V_s=1$, 其他符号表示如下 (图 1-7)。

$$\text{土粒重力 } W_s = d_s V_s \gamma_w = d_s \gamma_w$$

$$\text{水重力 } W_w = w W_s = w d_s \gamma_w$$

$$\text{土总重力 } W = W_s + W_w = d_s \gamma_w (1+w)$$

$$\text{水体积 } V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = w d_s$$

$$\text{土总体积 } V = \frac{W}{\gamma} = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma}$$

$$\text{孔隙体积 } V_v = V - V_s = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1$$

$$\text{或 } V_v = e V_s = e$$

$$\text{故总体积 } V = V_v + V_s = e + 1$$

有了上述变换后, 便可根据各指标的定义求得换算公式。

$$\text{由式 (1-9)} \quad e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1 \quad (1-11)$$

$$\text{由式 (1-5)} \quad \gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} = \frac{(d_s + e) \gamma_w}{1+e} \quad (1-12)$$

$$\text{由式 (1-6)} \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{d_s \gamma_w}{1+e}$$

$$\text{或} \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma}{1+w} \quad (1-13)$$

$$\text{由式 (1-7)} \quad \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{(d_s - 1) \gamma_w}{1+e} \quad (1-14)$$

$$\text{由式 (1-8)} \quad n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = \left[1 - \frac{\gamma}{d_s \gamma_w (1+w)} \right] \times 100\%$$

$$\text{由式 (1-10)} \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{w d_s}{e} \times 100\% \quad (1-16)$$

【例 1-1】 某原状土样由室内试验得土的天然重度 $\gamma = 18.62 \text{ kN/m}^3$, 土粒比重 $d_s = 2.69$, 天然含水量 $w = 29\%$, 试求土的孔隙比 e 、孔隙率 n 、饱和度 S_r 、饱和土重度 γ_{sat} 、干土重度 γ_d 、有效重度 γ' 。

$$\begin{aligned} \text{【解】 孔隙比 } e &= \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{2.69 \times 9.8 (1+0.29)}{18.62} - 1 \\ &= 0.826 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{孔隙率 } n &= \left[1 - \frac{\gamma}{d_s \gamma_w (1+w)} \right] \times 100\% \\ &= \left[1 - \frac{18.62}{2.69 \times 9.8 (1+0.29)} \right] \times 100\% \\ &= 45.2\% \end{aligned}$$

$$\text{或 } n = \frac{e}{1+e} \times 100\% = \frac{0.826}{1+0.826} \times 100\%$$

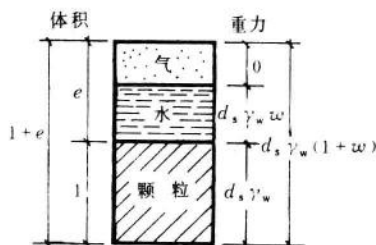


图 1-7 土的三相物理指标换算图

$$\begin{aligned}
&=45.2\% \\
\text{饱和度 } S_r &= \frac{d_s w}{e} \times 100\% = \frac{2.69 \times 0.29}{0.826} \times 100\% \\
&=94.4\% \\
\text{饱和土重度 } \gamma_{\text{sat}} &= \frac{(d_s + e) \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.69 + 0.826) \cdot 9.8}{1 + 0.826} \\
&=18.87\text{kN/m}^3 \\
\text{干土重度 } \gamma_d &= \frac{\gamma}{1 + w} = \frac{18.62}{1 + 0.29} = 14.43\text{kN/m}^3 \\
\text{有效重度 } \gamma' &= \frac{(d_s - 1) \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.69 - 1) \cdot 9.8}{1 + 0.826} \\
&=9.07\text{kN/m}^3 \\
\text{或 } \gamma' &= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 18.87 - 9.8 = 9.07\text{kN/m}^3
\end{aligned}$$

第四节 无粘性土的特征

无粘性土一般是指具有单粒结构的碎石土与砂土，天然状态下无粘性土具有不同的密实程度。疏松状态时，其压缩性与透水性较高，强度较低。密实状态时，其压缩性小，强度较高，为良好的天然地基。工程上常用密实度来评定无粘性土的地基承载力。

对于碎石土的密实度，可根据野外鉴别方法（表 1-3）确定，其密实度分为密实、中密和稍密三种状态。

碎石土密实度野外鉴别方法

表 1-3

密实度	骨架颗粒含量和排列	可 挖 性	可 钻 性
密实	骨架颗粒含量大于总重的 70%，呈交错排列，连续接触	锹镐挖掘困难，用撬棍方能松动；井壁一般较稳定	钻进极困难；冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动剧烈；孔壁较稳定
中密	骨架颗粒含量等于总重的 60%~70%，呈交错排列，大部分接触	锹镐可挖掘；井壁有掉块现象，从井壁取出大颗粒处，能保持颗粒凹面形状	钻进较困难；冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动不剧烈；孔壁有坍塌现象
稍密	骨架颗粒含量小于总重的 60%，排列混乱，大部分不接触	锹可以挖掘；井壁易坍塌，从井壁取出大颗粒后，砂土立即坍落	钻进较容易；冲击钻探时，钻杆稍有跳动，孔壁易坍塌

注：1. 骨架颗粒系指与表 1-6 相对应粒径的颗粒；
2. 碎石土的密实度，应按表列各项要求综合确定。

对于砂土的密实度，过去均用孔隙比 e 的大小来评定，考虑到原状砂样一般不易从现场采取，故《建筑地基基础设计规范》（GBJ7—89）^① 提出用标准贯入试验锤击数 N （即 $N_{63.5}$ ）确定砂土的密实度：

- $N \leq 10$
松散
- $10 < N \leq 15$
稍密
- $15 < N \leq 30$
中密
- $N > 30$
密实

^① 以下简称《地基规范》。

第五节 粘性土的特征

粘性土主要成分是粘粒，土粒细，土的比表面大（单位体积的颗粒总表面积），土粒表面与水相互作用的能力较强。土粒表面带有负电荷，在电场作用下具有电性质（电渗、电泳和离子交换等现象）。土粒间存在粘聚力而使土具有粘性。土的结构有很大的孔隙，使土具有结构性。随着土中含水量的不同而使土具有不同的工程性质。

一、界限含水量

粘性土由某一种状态转入另一种状态时的分界含水量称为界限含水量。土由半固态转为固态的界限含水量称为缩限 w_s 。土由可塑状态转为半固态的界限含水量称为塑限 w_p ，也称塑性下限含水量。土由流动状态转为可塑状态的界限含水量称为液限 w_L ，也称塑性上限含水量（图 1-8）。

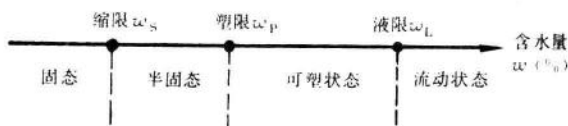


图 1-8 土的物理状态与含水量的关系

土中含有大量自由水时呈流动状态，即土粒间为自由水所分开。土粒在外力作用下可相互滑动而不破坏土粒间的联系，土呈可塑状态。可塑状态的土可塑成各种形状而不发生裂缝，在外力除去后仍可保持原状。当弱结合水减少而主要含强结合水时，土呈半固态。当土中只含有强结合水时，土呈固体状态。随着含水量的增加，土可从固体状态经可塑状态而转为流塑状态，土的强度亦相应显著降低。

二、塑性指数和液性指数

塑性指数表示土的可塑性范围：

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-17)$$

式中 I_p ——塑性指数；

w_L ——液限（%）；

w_p ——塑限（%）。

塑性指数愈高，即液限与塑限的差值愈大（计算时不带%）表示土中细粒含量增多，含水量范围增大，土的粘性与可塑性愈好。塑性指数 $I_p > 10$ 的土为粘性土，其中：

$10 < I_p \leq 17$ 为粉质粘土

$I_p > 17$ 为粘土

液性指数是判别粘性土的软硬程度的指标，又称稠度。液性指数 I_L 可按下式计算：

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (1-18)$$

从上式看出，当 $w < w_p$ 时， $I_L < 0$ ，土为坚硬状态。当 $w > w_L$ 时， $I_L > 1$ ，土为流塑状态。当 w 在 w_p 与 w_L 之间，即 I_L 在 0 与 1 之间时，为可塑状态。工程上根据 I_L 值将粘性